

# Optische detectie van drukgolven in weefselsimulant

N. van de Heiden (TNO-PML) en C. Smorenborg (TNO-TPD)

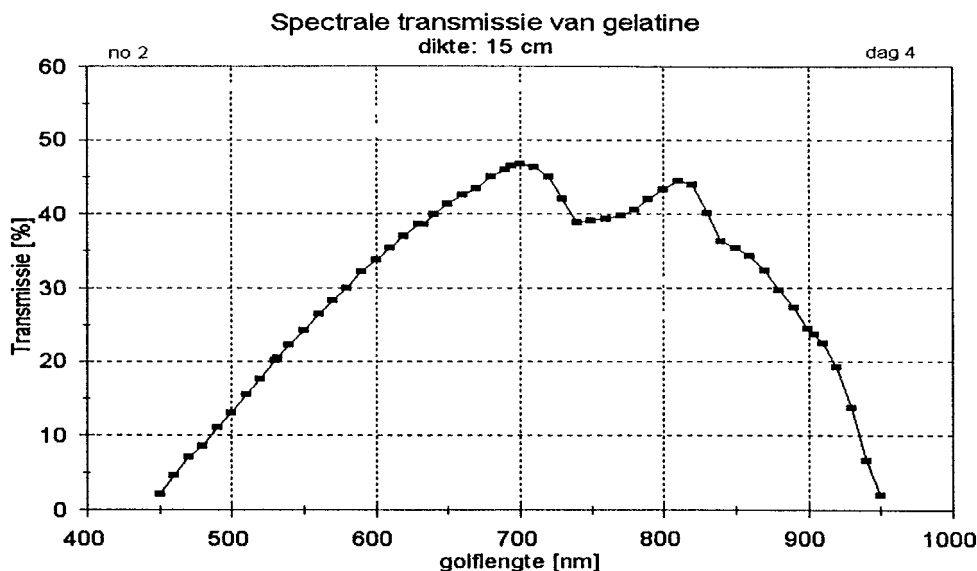
## 1. Inleiding

In het menselijk lichaam kunnen schokgolven schade aan weefsels en organen veroorzaken. Dergelijke schokgolven kunnen ontstaan door botsing van het lichaam met een stomp voorwerp. Gedacht kan worden aan een verkeersongeval (hoofd tegen de autoruit), het effect van een stopkogel of de inslag van een kogel op van een kogelwerend vest. Het verschijnsel is bekend onder de naam Blunt Trauma.

Door het bestuderen van de schokgolven in een weefselsimulant, waarvoor dikwijls gelatine wordt toegepast, verkrijgt men inzicht in het schade veroorzakend effect hiervan en kan men de bescherming hier-

tegen verbeteren. Het uiteindelijke doel is een optimale letselpreventie te verkrijgen. Door TNO - Prins Maurits Laboratorium en TNO - Technisch Fysische Dienst is een onderzoek gestart om met optische technieken te meten aan schokgolven in gelatine. Het doel van de optische metingen is om enerzijds schokgolven (en reflecties tegen structuren) zichtbaar te maken en anderzijds om hiermee lokaal kwantitatief de druk te bepalen.

In het onderzoek tot nu toe zijn verschillende optische technieken vergeleken m.b.t toepassingsmogelijkheden en zijn proeven verricht om de schokgolven zichtbaar te



Figuur 1  
Spectrale transmissie van een blok gelatine (dikte 15 cm)

maken, gecombineerd met enkele lokale metingen met druksensoren.

Dit inleidend onderzoek is een eerste stap in de ontwikkeling van een praktisch meet-concept

## 2. Drukgolven in gelatine

Gelatine dat als weefsel-simulant gebruikt wordt, bestaat voor 80% uit water. In het water wordt gelatinepoeder gemengd. De spectrale transmissie is weergegeven in figuur 1. Het is goed transparant van 600 - 900 nm, waarbinnen optische metingen in principe mogelijk zijn. Een punt van aandacht hierbij is de afwerking van de zijvlakken (ribbels) en de verstrooiing van het licht in het gelatine blok.

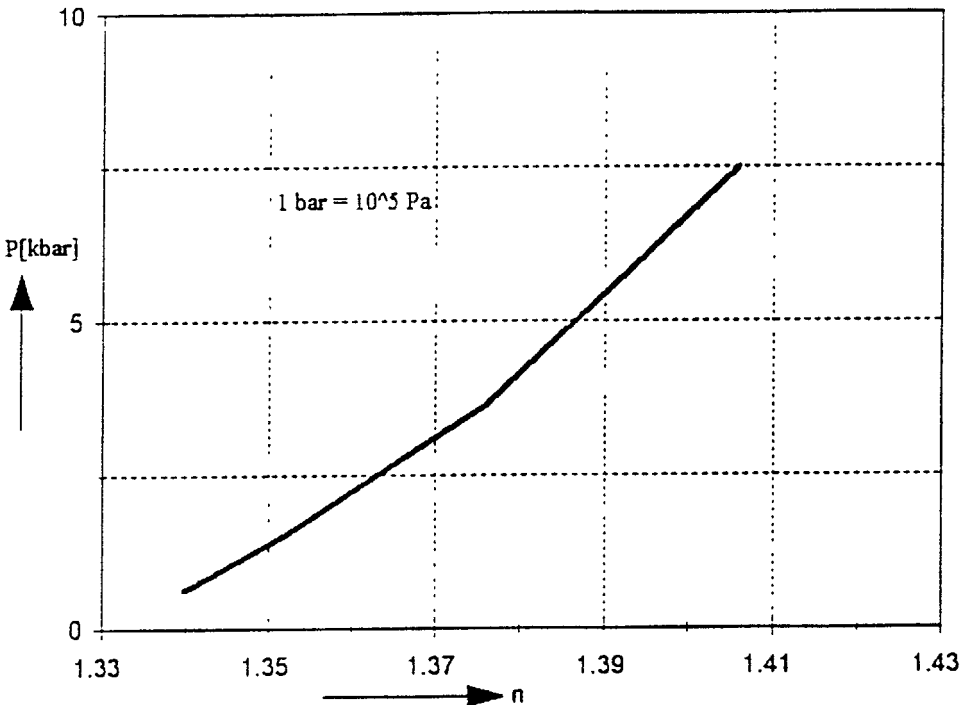
Om van optische meting tot lokale drukbepaling te komen zijn de volgende stappen nodig

1. Optische meting (intensiteit, eventueel met fase informatie).
2. Bepaling brekingsindexverloop ter plaatse van de schokgolf.
3. Vertaling van de brekingsindex naar druk.

Uiteindelijk dient dan de relatie tussen druk en weefsel/orgaanschade bepaald te worden.

Over schokgolven in gelatine is weinig in de literatuur te vinden. Daarentegen is meer bekend over schokgolven in water. Het drukverloop over een schokgolf is karakteristiek (zie b.v. ref.1): eerst een snelle druktoename (tot MPa), gevolgd door een onderdruk, waarna nog enige uitslingering optreedt.

De schade wordt veroorzaakt door de piekdruk, eventueel in combinatie met de on-



Figuur 2  
Verband tussen druk en brekingsindex van water.

derdruk. In de literatuur wordt op verschillende plaatsen ingegaan op het verband tussen brekingsindex en de dichtheid van bv. water, terwijl ook het verband tussen dichtheid en druk gegeven wordt (ref. 1, 2 en 3).

Een experimenteel verband tussen druk en brekingsindex is weergegeven in figuur 2.

Een eenvoudige benadering is

$$P \text{ (MPa)} = \frac{n - n_0}{1.4 \cdot 10^{-4}}, \text{ waarbij } n_0 = 1.33.$$

Het verband tussen brekingsindex en druk bij gelatine is niet duidelijk. In de literatuur is hierover niets gevonden. Verder onderzoek is nodig, waarbij het verband, dat voor water geldt waarschijnlijk goed als uitgangspunt kan dienen

### *Meetmethoden*

Er zijn verschillende optische meetmethoden, waarmee informatie over brekingsindex variaties in een transparant medium te verkrijgen is.

Interferometrie is gebaseerd op het meten van fase verschillen en geeft daarom direct informatie over de brekingsindex.

Daarnaast zijn er Schlieren, shadowgrafie en moiré technieken, die gebaseerd zijn op de deviatie van lichtstralen door de brekingsindex gradiënten in het medium. Deze technieken zijn zeer geschikt voor het visualiseren van een schokgolf en leveren indirect informatie over de brekingsindex. In ref. 1 wordt bv. een kwantitatieve Schlierenmethode beschreven, waarmee de brekingsindex distributie over de schokgolf bepaald kan worden. Voor deze bepaling zijn metingen aan 100(!) schokgolven verricht. Ook in ref. 3 wordt uit een aantal schlieren opnamen kwantitatieve gegevens gehaald. Door het vereiste aantal metingen lijkt deze techniek niet bruikbaar voor de beoogde toepassing.

Opgemerkt moet worden, dat de snelheid van een schokgolf in water (en ook in gelatine) ca. 1550 m/s is, zodat de meting in zeer korte tijd moet plaatsvinden.

Om gevoel te krijgen voor de optische mogelijkheden van diverse meetmethoden

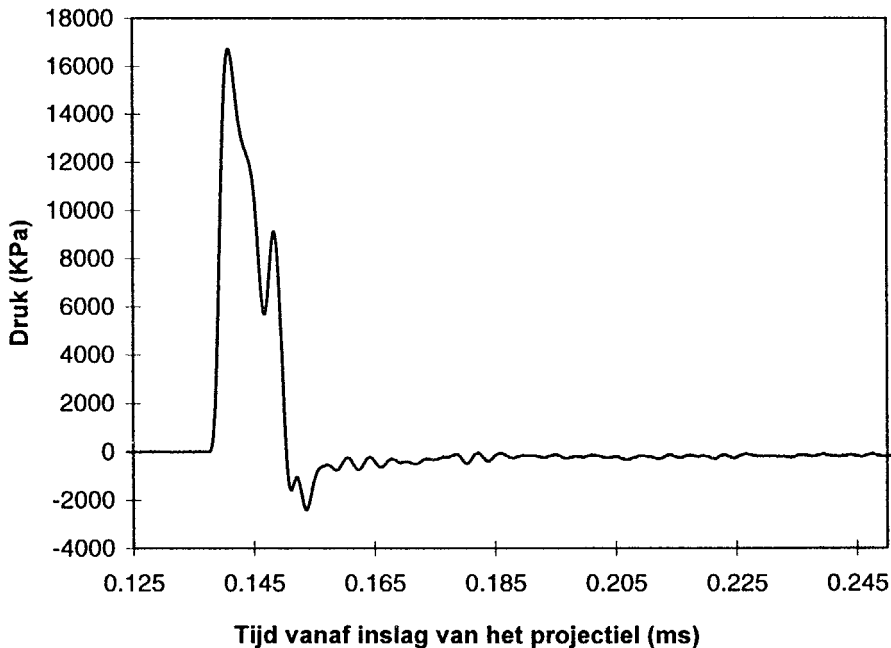
zijn bij TNO-PML enkele opnamen gemaakt van schokgolven in gelatine met een hoge snelheidscamera

## **3. Metingen aan drukgolven in gelatine m.b.v. hoge snelheidsfotografie**

### *3.1 De meetopstelling*

De metingen aan gelatine zijn verricht bij het Laboratorium voor Ballistisch Onderzoek (LBO), een onderdeel van het Prins Maurits Laboratorium van TNO. In dit laboratorium wordt onderzoek gedaan naar de uitwerking van projectielen op beschermende materialen, waarbij moet worden gedacht aan scherf- en kogelwerende vesten, helmen, brillen, maar ook kogelwerend glas, tankpantser en bescherming tegen mijnen en granaten. Eén van de onderzoeksgebieden is de beschermende kleding voor militairen en politie. Om de interactie van (een gestopt) projectiel met menselijk weefsel te bestuderen wordt gebruik gemaakt van gelatine. Dit komt redelijk overeen met de weerstandswaarde van menselijk weefsel. Gelatine heeft het bijkomende voordeel, dat het transparant is, (zie figuur 1) zodat ook met optische technieken de verschijnselen in de gelatine kunnen worden vastgelegd. Eén van deze verschijnselen is het ontstaan van een drukgolf door de inslag van het projectiel. Voor het opwekken van een schokgolf wordt in het laboratorium een projectiel van 7.62 mm doorsnede gebruikt. Deze krijgt een snelheid van ca. 800 m/s (= 2800 km/uur). De energie van het projectiel is ongeveer 3000 J. De grootte en de vorm van de drukgolf in de gelatine, die veroorzaakt wordt door de inslag van het projectiel hangt af van absorptie (of dikte) en aangrijpend oppervlak van het doelmateriaal. Om inzicht te krijgen in deze waarden zullen metingen moeten worden uitgevoerd, die de drukgolf weergeven, zodat eigenschappen als snelheid, breedte en vorm kunnen worden beoordeeld.

De grootte van de drukgolf is in principe te meten met druksensoren (zie b.v. figuur 3).



Figuur 3

Drukprofiel van de schokgolf in gelatine veroorzaakt door inslag van een 7,62 mm projectiel op een kogelwerend vest

De druksensor die voor deze meting is gebruikt, is een piëzo-resistieve opnamer van het merk Endevco (type 8511).

De meetopstelling, die gebruikt wordt voor het visualiseren en meten van de drukgolf in gelatine is schematisch weergegeven in figuur 4 (a en b).

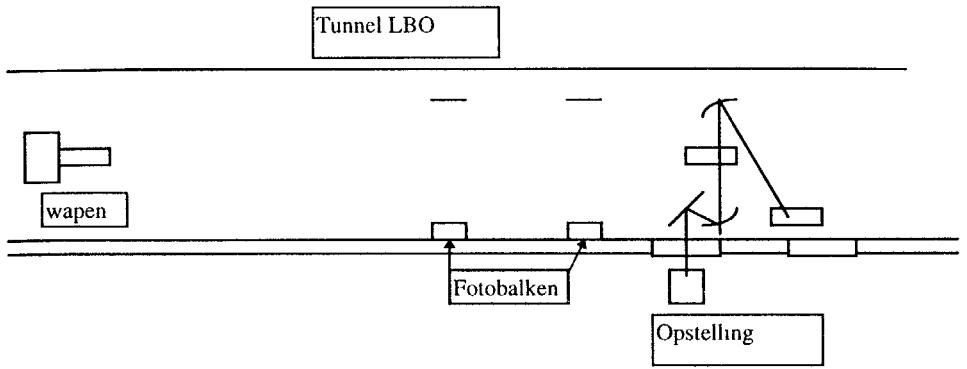
Het is een Schlieren meetopstelling. Door verwijdering van het meskant verkrijgt men z.g. shadow grafie opnamen.

In de opstelling wordt gebruik gemaakt van een puntlichtbron. Deze wordt gegeneerd door het licht van een Argon laser (met een vermogen van 5 Watt) door een spatial filter te sturen. Het spatial filter bestaat uit een objectief van 20x en een pinhole met een diameter van 10  $\mu\text{m}$ . Dit pinhole is geplaatst in het brandpunt van een sferische spiegel met een brandpunt van 2,5 meter. De evenwijdige bundel, die ontstaat wordt door de te meten gelatine

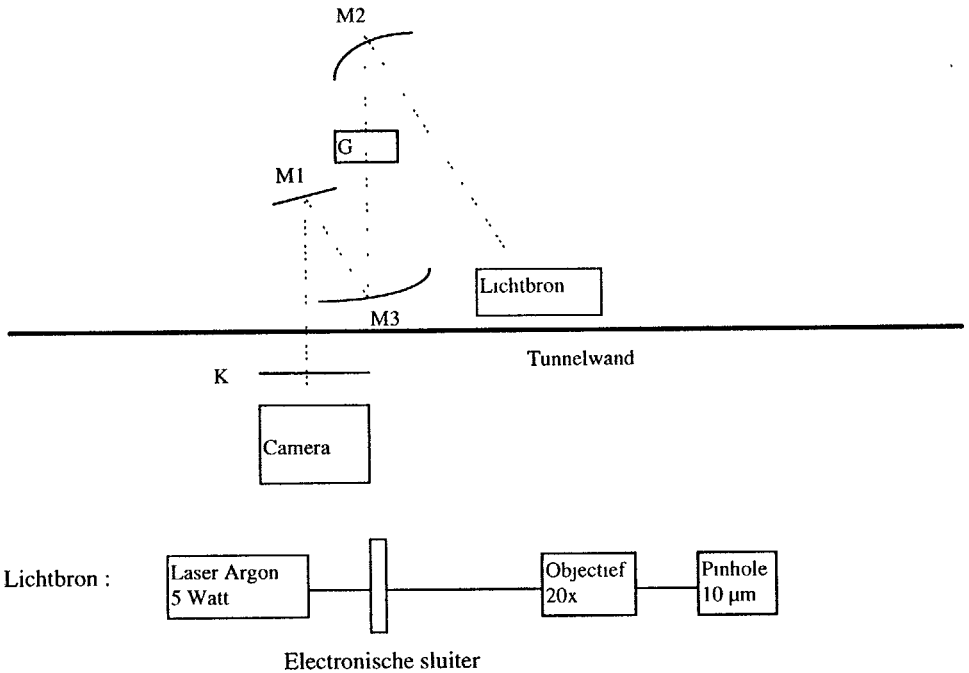
geleid en d.m.v. een tweede sferische spiegel ( $f=2,5$  m) voor de hoge snelheids-camera gefocuseerd. Een voorbeeld van een schaduwopname is gegeven in figuur 5. Hier zijn duidelijk de drukgolven te zien die ontstaan wanneer een projectiel met snelheid hoger dan de geluidssnelheid (in dit geval 810 m/s tegen een geluidssnelheid van 330 m/s) door de lucht vliegt.

De reden voor het zichtbaar zijn van de drukgolven is, dat deze een dichtheidsverandering in de lucht teweeg brengt, welke zich vertaalt in een verandering van de brekingsindex. Het licht wordt hierdoor afgebogen, waardoor een donkere zone ontstaat.

De opname uit figuur 5 is gemaakt met de Imacon hoge snelheidscamera type 468. Deze camera is een electro optische camera die het licht dat binnenkomt omzet in electronen en deze vervolgens afbuigt

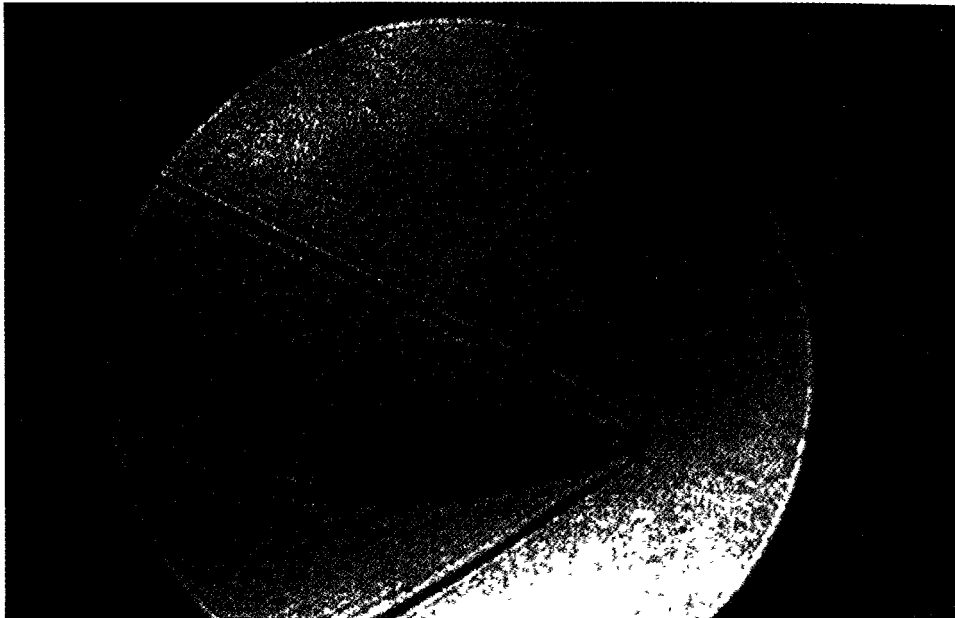


Figuur 4a  
Opstelling bij TNO-PML voor het genereren van schokgolven.



- G Gelatine blok
- M1 Oppervlakte spiegel vlak
- M2+M3 Sferische oppervlakte spiegel (F=2.5 meter)
- K Meskant (voor Schlieren opstelling)
- Camera Keuze uit: Imacon 790, Imacon 468 of Still Video Range (SVR) hoge snelheid camera (allen van de firma Hadland)

Figuur 4b  
Meetopstelling voor opnamen van schokgolven in gelatine.



Figuur 5  
Projectiel in vlucht; 7,62 mm diameter met een snelheid van 800 m/s

m.b.v. HV platen. De elektronenbundel wordt achtereenvolgens afgebogen naar vijf verschillende CCD chips (resolutie per CCD chip 1000 x 700 pixels). De camera maakt dus vijf opnamen met een resolutie per beeld van 1000 x 700 pixels. De tijd tussen de beeldjes kan worden ingesteld tot op 200 ns (dit betekent een maximale opnamesnelheid van 100 miljoen beeldjes per seconde). De belichtingstijd voor de beelden is ook variabel en bedraagt voor de opname uit figuur 3 200 ns. Een voorbeeld van een drukgolf in gelatine, gemaakt met de opstelling uit figuur 4 is weergegeven in figuur 6.

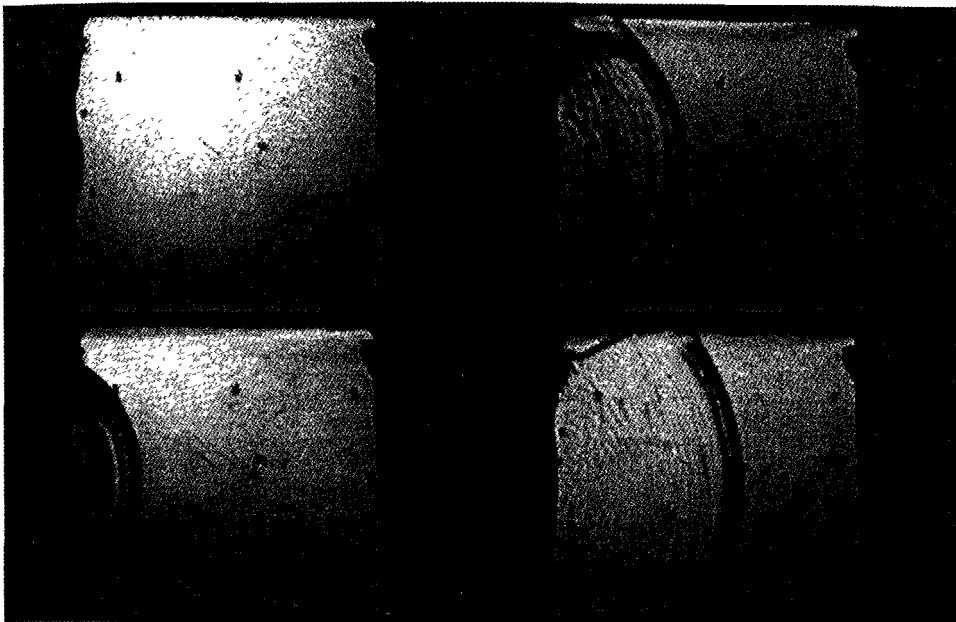
De gelatine is voor dit experiment geplaatst in een glazen bak om de zijkanten van de gelatine goed vlak te maken. De donkere strepen, die achter de eerste drukgolf zichtbaar zijn, zijn dan ook reflecties aan

de zijkanten van de glazen bak. De snelheid van de drukgolf is ca. 1550 m/s, hetgeen overeenkomt met de geluidssnelheid in gelatine. De tijd tussen de beeldjes in figuur 6 is 65  $\mu$ s en de belichtingstijd per beeldje is 1  $\mu$ s.

#### 4. Verder onderzoek

Met de bovengenoemde methode van visualisatie van drukgolven m.b.v. schaduwtechnieken is het goed mogelijk om de drukgolven zichtbaar te maken. Daarnaast kan met een sensor lokaal het drukverloop gemeten worden.

Het PML is momenteel bezig, in samenwerking met de TPD, om een optische methode te ontwikkelen, waarmee in een groter gebied de druk bepaald kan worden. Het is echter niet mogelijk om uit Shadowgrafie opnamen direct informatie over de druk ter plaatse van de schokgolf te verkrij-



Figuur 6  
Druk golf in gelatine bij inslag van een 7,62 projectiel op een kogelwerend vest.

gen.

Metingen met de opstelling met Schlieren hebben tot nu toe geen bevredigend resultaat gegeven, wellicht mede omdat gelatine toch een wat ander karakter heeft dan water. Daarnaast zijn voor kwantitatieve Schlieren metingen vele opnamen nodig, zoals reeds eerder vermeld.

Opnamen van een lijnenraster, welke tussen de gelatine en de spiegel M3 uit figuur 4 is geplaatst, geven verschuiving van de lijnen bij het schokgolf front te zien, waarvan plaats en grootte afhangen van brekingsindex variaties (dus van druk in de schokgolf) en die zeer goed op te meten zijn.

Momenteel wordt dit verschijnsel gemodelleerd met het optisch rekenprogramma CODE V, zodat naar verwachting kwantitatief het verband tussen brekingsindex verloop en lijnverschuiving bepaald kan

worden.

Een andere optische methode is toepassing van interferometrie. Uitwerking hiervan voor bepaling van drukvariaties in gelatine zal nog een aanzienlijke inspanning vergen

Zodra een optische methode zover is uitgewerkt, dat hiermee inderdaad kwantitatieve drukmeting over een groot veld met voldoende nauwkeurigheid mogelijk is, kan met het onderzoek naar optimalisering van de bescherming pas goed begonnen worden.

Bij verdere uitwerking van de optische meetmethoden is sinds kort ook de vakgroep Optica van de TU-Delft betrokken

## Referenties

1. A. Cwik, W. Erment  
A quantitative Schlieren method of the investigation of axisymmetrical shock waves. Proc. Of IEEE E 1993, ultrasonic symposium, p. 789 - 792
2. H.S. Yadav e.o.  
Measurement of refractive index of water under high dynamic pressures. I. App. Phys , Vol. 4.4, p. 2197 - 2200, 1973
3. M.T. Carnell, D.C. Emmong  
Quantitative Schlieren measurements of a high energy electromagnetic transducer acoustic shock field. Optics & Laser technology, Vol. 26, nr. 6, p. 385-391, 1994
- 4 R J. Goldstein  
Optical systems flow measurements; shadowgraph, schlieren and interferometric techniques.  
Optical systems for flow measurements, chapter 8